

## ТЕПЛО- И МАССООБМЕН, СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

### РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ОБОГРЕВА ГАЗОВЫХ КАМЕР ЛИНЕЙНОЙ ЯЧЕЙКИ КРУЭ ДЛЯ УСТАНОВКИ В РАЙОНАХ С ХОЛОДНЫМ КЛИМАТОМ<sup>1</sup>

© 2023 г. И. С. Антаненкова<sup>а</sup>\*, А. Ю. Баринов<sup>б</sup>, Ю. А. Геллер<sup>а</sup>, В. И. Кузнецов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

<sup>б</sup>ООО “Евроконтракт – Высоковольтные аппараты”,  
Объездное шоссе, д. 12, г. Балашиха, Московская обл., 143900 Россия

\*e-mail: antanenkovais@mail.ru

Поступила в редакцию 29.05.2023 г.

После доработки 21.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

В настоящее время большинство крупных электротехнических фирм мира занимаются разработкой и выпуском высоковольтного оборудования с использованием SF<sub>6</sub> (электротехнического газа или, как его чаще называют, элегаза). Элегаз – нетоксичное, стойкое, химически инертное, негорючее соединение, не имеющее цвета, запаха и вкуса, которое при 20°C и 0.1 МПа находится в газообразном состоянии. По совокупности своих свойств элегаз является наиболее предпочтительным для использования в качестве изолирующей и дугогасящей среды в электрических аппаратах. Однако при низких температурах элегаз переходит из газообразного в сжиженное состояние, что приводит к снижению его отключающей способности. С этой проблемой приходится сталкиваться при разработке аппаратов, предназначенных для установки на открытом воздухе в районах с холодным климатом. Этот недостаток может быть скомпенсирован с помощью обогрева аппаратов при температуре окружающей среды ниже температуры насыщения элегаза. Рассматривается решение данной задачи применительно к линейной ячейке комплектного распределительного устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ) ZF7-126 производства China XD Group и ЕК ВВА. Определена необходимая мощность устройства для обогрева камер КРУЭ, заполненных элегазом, при условии вывода оборудования из холодного состояния при температуре окружающей среды –45°C в течение 2 ч. Мощность должна быть достаточной для обеспечения перехода элегаза из сжиженного состояния в газообразное (при температуре на внутренней стенке камеры –20°C), а также обогрева элементов корпуса камер КРУЭ и компенсации тепловых потерь с поверхности камер. Представлены результаты сравнения тепловых потерь с поверхности камер при размещении КРУЭ на открытом воздухе и в закрытом (неотапливаемом) помещении. Сформулированы рекомендации по выбору удельной мощности и длины греющего кабеля при обогреве участков цилиндрической поверхности камер КРУЭ. Приведены результаты расчета изменения температуры на внутренней стенке камеры по мере удаления от участков обогреваемой теплоизолированной поверхности.

*Ключевые слова:* элегаз, комплектное распределительное устройство, конденсация, удельная мощность греющего кабеля, надежность, тепловые потери, высоковольтное оборудование

**DOI:** 10.56304/S0040363623120019

Разработка и применение газонаполненного оборудования высокого напряжения: комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией, выключателей, газоизолированных линий – современный тренд развития высоковольтной техники электроэнергетических си-

стем. За рубежом широкое внедрение КРУЭ началось в конце 60-х годов XX в. [1]. В России накоплен более чем 40-летний опыт разработки и эксплуатации КРУЭ, компактных, надежных, пожаробезопасных и работающих в широком диапазоне номинальных напряжений [2–5].

Благодаря преимуществам элегаза перед другими изоляционными средами и положительному опыту эксплуатации КРУЭ внедрение такого оборудования стало общей тенденцией в российской энергетике, направленной на повышение

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № FSWF-2023-0017 (соглашение № 075-03-2023-383 от 18.01.2023) в сфере научной деятельности на 2023–2025 гг.

эффективности работы электросетевого комплекса [5]. По совокупности свойств элегаз является наиболее предпочтительным для использования в качестве изолирующей и дугогасящей среды. Однако при рабочих давлениях, необходимых для обеспечения изоляционной и коммутационной способности аппаратов, и при низких температурах элегаз частично переходит в жидкое состояние. Это приводит к снижению плотности газообразной фазы, что негативно влияет на свойства изоляции и функцию отключения коммутационных устройств. С этой проблемой приходится сталкиваться при разработке аппаратов, устанавливаемых на открытом воздухе (далее открытое размещение) для районов с холодным климатом. Отмеченный недостаток может быть скомпенсирован двумя способами. Первый заключается в частичном замещении элегаза другими газами, сжижающимися при более низких температурах, например азотом или тетрафторметаном. Однако изоляционные свойства таких смесей всегда ниже изоляционных свойств чистого элегаза. Кроме того, подобная замена приводит к снижению отключающей способности коммутационной аппаратуры. Для сохранения электрической прочности и коммутационной способности аппаратов необходимо повышение общего давления газа, а следовательно, и ужесточение требований к их прочности [6]. Вторым способом – применение обогрева оборудования при температуре окружающей среды ниже температуры насыщения элегаза при рабочем давлении.

Современное развитие кабельной техники существенно упрощает решение данной задачи при допустимом уровне увеличения затрат на доработку конструкции и эксплуатацию аппаратов. При этом на первый план выходит определение мощности, необходимой для обогрева газовых камер ячейки КРУЭ.

В настоящей работе рассматривается решение этой теплотехнической задачи применительно к линейной ячейке КРУЭ ZF7-126 производства China XD Group и ЕК ВВА, для которой определен диапазон рабочих температур от  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ . Если минимальная температура в зоне возможного открытого размещения КРУЭ опускается ниже рабочих значений, например до  $-45^{\circ}\text{C}$ , то следует организовать подогрев камер. В этом случае нужно определить требуемую мощность обогрева камер КРУЭ для обеспечения температуры элегаза в них не ниже температуры конденсации.

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСТРУКЦИЯ ЯЧЕЙКИ КРУЭ ZF7-126

В конструкции КРУЭ ZF7-126 применено трехфазное расположение главных контактов в едином корпусе с вертикальным размещением выключателя, к которому с одной стороны при-

стыкованы трехпозиционные разъединители/заземлители шин, а с другой – трансформатор тока и кабельный ввод. Камеры выключателя, трансформатора тока и кабельного ввода заполнены под давлением элегазом.

Далее приведены некоторые параметры КРУЭ:

Номинальное напряжение, кВ.....	126
Номинальный ток, А.....	3150
Кратковременно выдерживаемый ток, кА/время пропускания, с.....	50/3
Номинальный пиковый выдерживаемый ток, кА.....	125
Номинальное избыточное давление элегаза (при $20^{\circ}\text{C}$ ), МПа:	
в камере кабельного ввода.....	0.5
в других камерах.....	0.6
Годовая утечка элегаза, % (по массе).....	0.5

Конструкция типовой ячейки КРУЭ ZF7-126 показана на рис. 1, размеры ее основных элементов приведены в табл. 1.

Камеры КРУЭ изготовлены из алюминиевого сплава, теплофизические свойства которого допустимо принять такими же, как у алюминия: плотность  $\rho_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг/м}^3$ , теплоемкость  $c_{\text{Al}} = 0.9 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ .

#### РАСЧЕТ МАССЫ ГАЗА В КАМЕРАХ И НИЖНЕГО ПРЕДЕЛА ТЕМПЕРАТУРЫ, ПРИ КОТОРОЙ ОБЕСПЕЧИВАЕТСЯ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КРУЭ

Для безаварийной работы КРУЭ элегаз в его камерах должен находиться в газообразном состоянии. Теплофизические свойства элегаза, определенные при параметрах заполнения камер выключателя, трансформатора тока и кабельного ввода, представлены в табл. 2.

Камеры КРУЭ герметичны, следовательно, процессы охлаждения и конденсации (сжижения) элегаза при понижении температуры окружающей среды будут происходить при постоянном удельном объеме (плотности). При температуре  $-20^{\circ}\text{C}$  во всех рассматриваемых камерах КРУЭ элегаз также будет находиться в газообразном состоянии. Однако уже при температуре окружающей среды, равной температуре насыщения  $t_s = -26.2^{\circ}\text{C}$  ( $v = 0.021738 \text{ м}^3/\text{кг}$ ), в камерах выключателя и трансформатора тока начнется конденсация элегаза, а в камере кабельного ввода – при  $t_s = -31.1^{\circ}\text{C}$  ( $v = 0.025736 \text{ м}^3/\text{кг}$ ). Дальнейшее понижение температуры элегаза (ниже температуры конденсации) приведет к выпадению жидкой фазы вещества в камерах КРУЭ. Следует также отметить, что при последующем охлаждении вещества произойдет

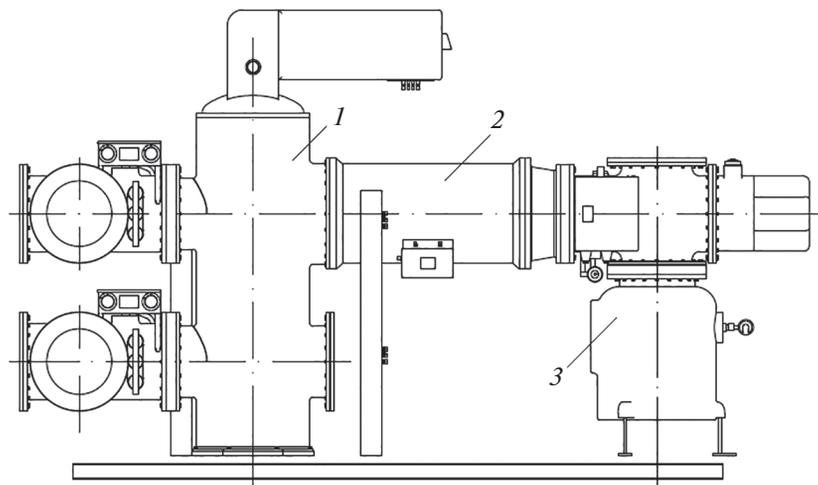


Рис. 1. Типовая ячейка КРУЭ 110 кВ (ZF7-126) с камерами выключателя 1, трансформатора тока 2 и кабельного ввода 3

Таблица 1. Размеры элементов типовой ячейки КРУЭ ZF7-126, мм

Элемент КРУЭ	$D$	$L$	$\delta$
Камера выключателя:			
цилиндрический корпус	980	2217	8
торцевая крышка (2 шт.)	980	—	35
боковая крышка	730	—	35
Камера трансформатора тока:			
цилиндрический корпус	810	1591	8
торцевая крышка (2 шт.)	810	—	35
Камера кабельного ввода:			
цилиндрический корпус	866	800	8
торцевая крышка (2 шт.)	866	—	35
боковая крышка	470	—	35

Примечание.  $D$  – диаметр;  $L$  – высота (длина);  $\delta$  – толщина.

Таблица 2. Теплофизические свойства элегаза в камерах КРУЭ [7]

$p_f$ , МПа	$v_f$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho_f$ , кг/м <sup>3</sup>	$h_f$ , кДж/кг	$u_f$ , кДж/кг
Температура 20°C				
0.6	0.025736	38.857	304.82	289.37
0.7	0.021738	46.002	304.07	288.85
Температура -20°C				
0.50140	0.025736	38.857	279.13	266.23
0.58093	0.021738	46.002	278.21	265.58

Примечание.  $p_f$  – абсолютное давление;  $v_f$  – удельный объем;  $\rho_f$  – плотность;  $h_f$  – энтальпия;  $u_f$  – внутренняя энергия.

его переход в твердую фазу, так как температура тройной точки элегаза составляет  $-49.6^{\circ}\text{C}$  [7].

Ввиду довольно сложной конструкции камер КРУЭ, отсутствия точных данных о геометрических параметрах оборудования, размещаемого внутри них, при проведении оценочных расчетов массы элегаза можно принять, что камеры представляют собой полые цилиндры с двумя торцевыми крышками заданных размеров, заполненные элегазом при номинальных параметрах. Тогда масса элегаза  $m_{f\_i}$ , кг, закачанного в корпус каждой  $i$ -й камеры, может быть вычислена по соотношению

$$m_{f\_i} = \frac{V_i}{v_{f\_i}}, \quad (1)$$

где

$$V_i = \pi \left( \frac{D_i - 2\delta_i}{2} \right)^2 L_i$$

– внутренний объем цилиндрической части камеры, м<sup>3</sup>;  $v_{f\_i}$  – удельный объем элегаза в камере, м<sup>3</sup>/кг, при параметрах заполнения (см. табл. 2);  $D_i$  – наружный диаметр корпуса камеры, м;  $L_i$ ,  $\delta_i$  – высота (длина) и толщина стенки цилиндрической части корпуса камеры, м.

Масса элегаза в камере выключателя КРУЭ ZF7-126 составляет 74.5 кг, в камерах трансформатора тока и кабельного ввода – 36.3 и 17.7 кг соответственно.

### ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ОБОГРЕВА КАМЕР КРУЭ БЕЗ ИЗОЛЯЦИИ

Обеспечение надежной работы КРУЭ при их размещении на открытом воздухе и снижении температуры окружающей среды ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  возможно при обогреве камер, которое начинается при включении термореле камеры выключателя. При этом мощность обогрева должна быть достаточной для покрытия тепловой нагрузки при переходе сжиженного элегаза в газообразное состояние (например, при пуске из холодного состояния), нагрева элементов корпуса и компенсации тепловых потерь в окружающую среду с поверхности камер.

*Расчет количества тепла, необходимого для перехода сжиженного элегаза в газообразное состояние*

При температуре  $-45^{\circ}\text{C}$  элегаз в камерах КРУЭ распадается на жидкую и газообразную фазы. При этом происходит потеря работоспособности оборудования, для восстановления которой достаточно обеспечить подогрев элегаза до температуры  $-20^{\circ}\text{C}$  (рис. 2).

Тепло, необходимое для нагрева элегаза в камерах КРУЭ от  $-45$  до  $-20^{\circ}\text{C}$ , рассчитывается в соответствии с первым законом термодинамики  $Q = \Delta U + p\Delta V$  (здесь  $Q$  – количество тепла;  $U$  – внутренняя энергия;  $p$  – давление;  $V$  – объем). С учетом постоянства объема элегаза в камерах  $p\Delta V = 0$

$$Q_{f\_i} = m_{f\_i} (u_{f\_i}^{-20} - u_{f\_i}^{-45}),$$

где  $u_{f\_i}^{-20}$  – внутренняя энергия газообразного элегаза при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$  (см. табл. 1);  $u_{f\_i}^{-45} = h_{f\_i}^{-45} - p_{s\_i}^{-45} v_{f\_i}^{-45}$  – внутренняя энергия частично сжиженного элегаза при температуре  $-45^{\circ}\text{C}$ ;  $h_{f\_i}^{-45}, p_{s\_i}^{-45}, v_{f\_i}^{-45}$  – удельная энтальпия, давление и удельный объем элегаза при температуре  $-45^{\circ}\text{C}$ .

Для определения термодинамических свойств элегаза при температуре  $-45^{\circ}\text{C}$  необходимо установить степень его сухости  $x_i$  – долю вещества в газообразном состоянии по отношению к его общей массе в камере:

$$x_i = \frac{v_{f\_i}^{-45} - v_{f\_l}^{-45}}{v_{f\_g}^{-45} - v_{f\_l}^{-45}},$$

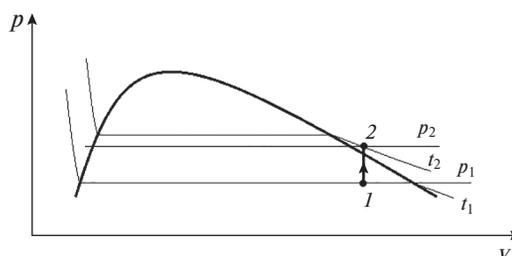
где  $v_{f\_l}^{-45} = 0.00054877$ ,  $v_{f\_g}^{-45} = 0.042685$  – удельные объемы жидкости и газа при температуре насыщения  $-45^{\circ}\text{C}$ , м<sup>3</sup>/кг.

Удельная энтальпия частично сжиженного элегаза  $h_{f\_i}^{-45}$  может быть вычислена по формуле

$$h_{f\_i}^{-45} = h_{f\_l}^{-45} + (h_{f\_g}^{-45} - h_{f\_l}^{-45}) x_i,$$

где  $h_{f\_l}^{-45} = 157.96$ ,  $h_{f\_g}^{-45} = 266.63$  – удельные энтальпии жидкости и газа при температуре насыщения  $-45^{\circ}\text{C}$ , кДж/кг.

Давление насыщения элегаза при температуре  $-45^{\circ}\text{C}$  составляет 0.27982 МПа.



**Рис. 2.**  $p, v$ -диаграмма процесса изохорного нагрева элегаза. 1–2 – процесс изохорного нагрева элегаза от  $t_1 = -45^{\circ}\text{C}$  до  $t_2 = -20^{\circ}\text{C}$ ;  $p_1, p_2$  – давление элегаза в состояниях 1, 2

*Расчет количества тепла, необходимого для нагрева элементов корпуса камеры*

Общая масса корпуса камеры КРУЭ  $M_{Al\_i}$ , изготовленной из алюминия, может быть вычислена путем суммирования масс цилиндрической части и торцевых и боковых крышек (если таковые имеются):

$$M_{Al\_i} = \rho_{Al} (V_{cil\_i} + \sum V_{cap\_i}),$$

где

$$V_{cil\_i} = \frac{\pi(D_i^2 - d_i^2)}{4} L_i$$

– объем цилиндрической части корпуса, м<sup>3</sup>;

$$d_i = D_i - 2\delta_i$$

– внутренний диаметр корпуса камеры, м;

$$V_{cap\_i} = \frac{\pi D_i^2}{4} \delta_i$$

– объем торцевой (боковой) крышки, м<sup>3</sup>.

Количество тепла  $Q_{Al\_i}$ , которое необходимо подвести для нагрева этой конструкции на  $\Delta t = 25^\circ\text{C}$  (от  $-45$  до  $-20^\circ\text{C}$ ), составит

$$Q_{Al\_i} = M_{Al\_i} c_{Al} \Delta t.$$

Результаты расчета количества тепла, требуемого для вывода оборудования КРУЭ ZF7-126 из холодного состояния (нагрева элегаза и элементов корпуса камер от температуры  $-45^\circ\text{C}$  до температуры  $-20^\circ\text{C}$ ), представлены в табл. 3. Там же приведены результаты расчета тепловой мощности  $Q_{\tau\_i}$ , которая нужна, чтобы обеспечить переход элегаза в стабильное газообразное состояние при обогреве камер в течение 2 ч.

Следует также отметить, что при расчете массы элегаза в камерах КРУЭ не учитывалось размещаемое в них оборудование. Фактический (рабочий) объем заполняемых элегазом камер КРУЭ будет меньше, чем внутренний объем цилиндрической части камеры, следовательно, и масса элегаза в них будет меньше. Однако снижение тепловой мощности, необходимой для нагрева элегаза, будет скомпенсировано увеличением тепла, требуемого для прогрева элементов оборудования, размещенных в камерах (внутри корпусов).

Для обогрева камер КРУЭ, установленных на открытом воздухе, данной тепловой мощности будет недостаточно, так как непрерывное омывание поверхностей камер воздухом может приводить к существенным тепловым потерям, которые следует компенсировать.

*Расчет тепловых потерь в окружающую среду с поверхностей камер*

Максимальные тепловые потери с поверхности камеры происходят при наибольшей разности температур между конструктивными элементами и окружающей средой. Для поддержания элегаза в камере в газообразном состоянии нужно обеспечить температуру на внутренней стенке корпуса  $t_w$  не ниже  $-20^\circ\text{C}$ .

Тепловые потери с цилиндрической поверхности камеры КРУЭ в окружающую среду  $\Delta Q_{L\_i}$  рассчитываются по формуле

$$\Delta Q_{L\_i} = q_{L\_i} L_i,$$

где

$$q_{L\_i} = \frac{\pi(t_w - t_0)}{\frac{1}{2\lambda_{Al}} \ln\left(\frac{D_i}{d_i}\right) + \frac{1}{\alpha_{air} D_i}} \quad (2)$$

– линейная плотность теплового потока от внутренней стенки камеры в окружающую среду, Вт/м;  $t_w, t_0$  – температура на внутренней стенке корпуса и окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ ;  $\lambda_{Al} = 230$  Вт/(м · К) – коэффициент теплопроводности алюминия;  $\alpha_{air}$  – коэффициент теплоотдачи от корпуса камеры к окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Тепловые потери с крышек камер КРУЭ в окружающую среду  $\Delta Q_{cap\_i}$  могут быть рассчитаны по выражению

$$\Delta Q_{cap\_i} = q_{cap\_i} F_{cap\_i},$$

где

$$q_{cap} = \frac{t_w - t_0}{\frac{\delta_i}{\lambda_{Al}} + \frac{1}{\alpha_{air}}} \quad (3)$$

– плотность теплового потока с единицы площади поверхности крышки в окружающую среду, Вт/м<sup>2</sup>;

**Таблица 3.** Количество тепла для обогрева оборудования КРУЭ ZF7-126 (при выводе из холодного состояния)

Оборудование КРУЭ ZF7-126	$m_i$ , кг	$Q_{f\_i}$ , кДж	$M_{Al\_i}$ , кг	$Q_{Al\_i}$ , кДж	$Q_{\tau\_i} = \frac{Q_{f\_i} + Q_{Al\_i}}{\tau}$ , кВт
Камера:					
выключателя	74.5	4404	328.1	7381	1.64
трансформатора тока	36.3	2144	183.9	4137	0.87
кабельного ввода	17.7	892	174.1	3916	0.67
Итого	128.5	7440	686.1	15434	3.18

Примечание.  $\tau$  – время, с.

**Таблица 4.** Тепловые потери с поверхностей камер КРУЭ ZF7-126

Оборудование КРУЭ ZF7-126	$\Delta Q_i = \Delta Q_{L\_i} + \sum \Delta Q_{cap\_i}$ , Вт	
	Размещение	
	открытое	закрытое
Камера:		
выключателя	2472	999
трансформатора тока	2869	634
кабельного ввода	947	363
Итого	6288	1996

$$F_{cap\_i} = \frac{\pi D_i^2}{4}$$

– площадь омываемой поверхности крышки, м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплоотдачи от поверхности камеры к воздуху в формулах (2), (3) может быть определен для различных условий конвективно-го теплообмена [8]. При рассмотрении наилучшего варианта, когда камеры КРУЭ не защищены от воздействия омывающего их потока воздуха, преобладающим будет влияние вынужденной конвекции. При размещении оборудования КРУЭ в закрытых неотапливаемых помещениях (далее закрытое размещение) целесообразно рассматривать свободно-конвективный механизм теплоотдачи.

Для КРУЭ ZF7-126 была выполнена оценка тепловых потерь с неизолированной поверхности камеры при ее открытом размещении в окрестности г. Архангельск, где максимальная из средних скоростей ветра по румбам равна  $w_{air} = 3.6$  м/с [9]. Для сравнения также был выполнен расчет тепловых потерь с поверхности камер КРУЭ  $\Delta Q_i$  при закрытом их размещении при той же температуре окружающего воздуха. Результаты расчета представлены в табл. 4.

При расчете принимали, что одна из торцевых крышек камеры выключателя и кабельного ввода размещена на основании КРУЭ и, следовательно, потери в окружающую среду при их омывании воздухом равны нулю.

Коэффициент теплоотдачи с цилиндрических поверхностей корпусов камер при вынужденной конвекции составил 12–17 Вт/(м<sup>2</sup> · К), с поверхностей крышек – 14–16 Вт/(м<sup>2</sup> · К). При этом максимальные значения соответствовали горизонтальному размещению камер (камере трансформатора тока). При свободно-конвективном движении воздуха коэффициент теплоотдачи не превышал 6 Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности закрытого размещения оборудования КРУЭ (в ангарах), что позволяет более чем в 3 раза снизить тепловые потери с поверхности оборудования в окружающую среду.

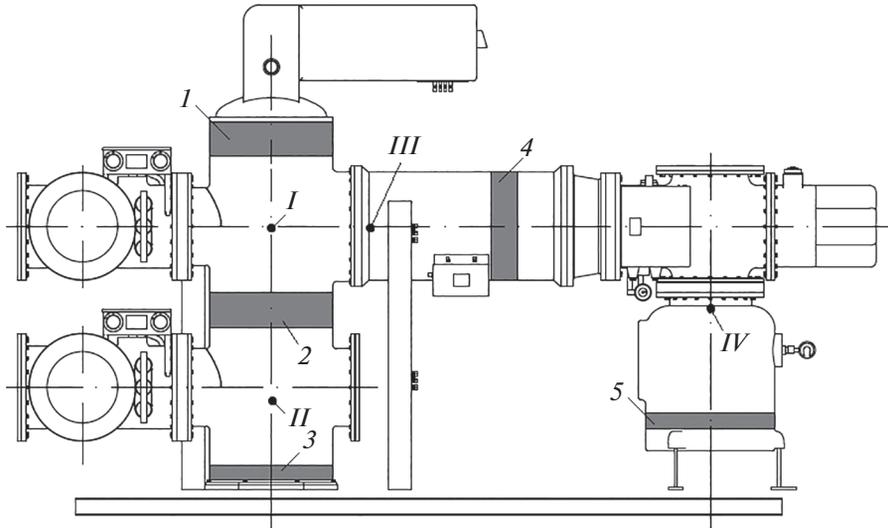
## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ОБОГРЕВА КАМЕР КРУЭ С ИЗОЛЯЦИЕЙ

Анализ геометрических параметров и эксплуатационных особенностей оборудования КРУЭ ZF7-126 позволил определить места возможного размещения нагревательной ленты на цилиндрических корпусах камер (рис. 3). Для этой цели подходит греющий кабель марки ЭНГЛ-1 производства ООО “Сокол-Электро”, который представляет собой плетеную ленту из стеклонити, состоящую из восьми нагревательных жил, изготовленных из нихрома. Снаружи нагреватели покрыты водонепроницаемой оболочкой из кремнийорганической резины. Концевые опрессовки выполнены из такой же резины. Далее приведены технические характеристики кабеля [10]:

Температура нагревателя, °С:	
максимальная.....	180*
по заказу.....	250
Минимальная температура	
окружающей среды, °С.....	–50
Минимальный радиус изгиба, мм.....	20
Размеры сечения активной части, мм:	
ширина.....	24 + 0.5
толщина.....	3.3 ± 0.5
Напряжение, В:	
переменное.....	220/380
постоянное.....	12/24
Длина низкотемпературных	
медных выводов, мм.....	1000

Слой греющего кабеля можно покрыть тепловой изоляцией толщиной  $\delta_{is} = 10$  мм [в общем случае при коэффициенте теплопроводности  $\lambda_{is} = 0.042$  Вт/(м · К)].

\* Температура поверхности нагревателя не должна превышать максимальную температуру, которую выдерживают его конструкционные материалы. Для этого следует ограничить температуру трубы или обогреваемого изделия до безопасного уровня путем расчета конструкции (стабилизированная конструкция) или организации температурного контроля.



**Рис. 3.** Типовая ячейка КРУЭ 110 кВ с теплоизолированными участками нагрева.  
 $H_{is}$ , мм: 1 – 267; 2 – 240; 3 – 108; 4 – 213; 5 – 108; I–IV – характерные точки на максимальном расстоянии от участка обогрева

На рис. 3 показан возможный вариант размещения на корпусе камеры нагревательной ленты с тепловой изоляцией высотой  $H_{is}$ .

При организации участков тепловой изоляции на цилиндрической поверхности корпуса камеры тепловые потери в окружающую среду  $\Delta Q_{L-i}^{is}$  можно рассчитать по формуле

$$\Delta Q_{L-i}^{is} = q_{L-i}^{is} \sum_j H_{is-i} + q_{L-i} \left( L_i - \sum_j H_{is-i} \right),$$

где

$$q_{L-i}^{is} = [\pi(t_w - t_0)] / \left[ \frac{1}{2\lambda_{Al}} \ln\left(\frac{D_i}{d_i}\right) + \frac{1}{2\lambda_{rub}} \ln\left(\frac{D_{rub-i}}{D_i}\right) + \frac{1}{2\lambda_{is}} \ln\left(\frac{D_{is-i}}{D_{rub-i}}\right) + \frac{1}{\alpha_{air} D_{is-i}} \right];$$

$\lambda_{rub} = 0.13$  Вт/(м · К) – коэффициент теплопроводности кремнийорганической резины (оболочки греющего кабеля ЭНГЛ-1);  $D_{rub-i} = D_i + 2\delta_{rub}$  – наружный диаметр корпуса с намотанным греющим кабелем, м;  $\delta_{rub} = 3.3$  мм – толщина греющего кабеля;  $D_{is-i} = D_{rub-i} + 2\delta_{is}$  – наружный диаметр корпуса, покрытого тепловой изоляцией, м;  $j$  – чис-

ло теплоизолированных участков на цилиндрическом корпусе камеры.

Тепловые потери камер КРУЭ при их открытом размещении и тепловой изоляции участков цилиндрической поверхности снизились до 5502 Вт.

Тепловая мощность  $Q$ , необходимая для обогрева газовых камер КРУЭ ZF7-126 при их выводе в рабочий режим после длительного простоя при наименее оптимальных условиях эксплуатации для заданного региона (температура окружающей среды  $-45^\circ\text{C}$ , скорость ветра 3.6 м/с), указана в табл. 5.

При закрытом размещении КРУЭ требуемая тепловая мощность обогрева  $Q$  снижается до 2.51, 1.47 и 1.04 кВт соответственно для камер выключателя, трансформатора тока и кабельного ввода.

### РАСЧЕТ ДЛИНЫ ГРЕЮЩЕГО КАБЕЛЯ

Выбор удельной мощности греющего кабеля и расчет его длины обусловлены не только необходимостью покрытия тепловой нагрузки, но и проверкой обеспечения минимально допустимой температуры внутренней стенки корпуса камеры на максимально удаленном от участка обогрева расстоянии.

Для нахождения температурного поля [изменения температуры по высоте (длине) корпуса] можно принять стенку цилиндрического корпуса каждой камеры в виде ребра, контактирующего без зазора с обогреваемым участком. Схема рассматриваемого изолированного участка корпуса камеры выключателя показана на рис. 4.

Температура внутренней стенки цилиндрического корпуса камеры  $t_w$ ,  $^\circ\text{C}$ , может быть вычисле-

**Таблица 5.** Тепловая мощность для обогрева камер КРУЭ ZF7-126 при их выводе в рабочий режим после длительного простоя

Оборудование КРУЭ ZF7-126	$\Delta Q_{L-i}^{is}$ , кВт	$Q$ , кВт
Камера:		
выключателя	1.95	3.59
трансформатора тока	2.67	3.54
кабельного ввода	0.88	1.55

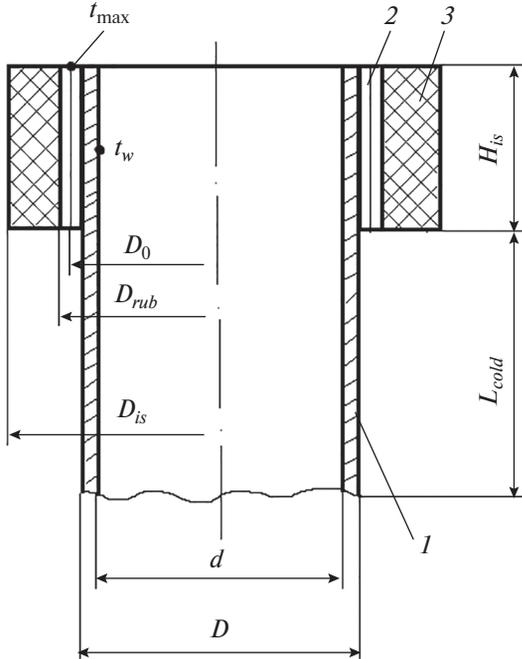


Рис. 4. Схема изолированного участка камеры выключателя.  
1 – корпус камеры; 2 – греющая лента; 3 – слой изоляции

на с помощью уравнения для линейной плотности теплового потока  $q_{L_i}$ :

$$q_{L_i} = \frac{Q}{\sum H_{is}} = \frac{\pi(t_{max} - t_w)}{\frac{1}{2\lambda_{rub}} \ln\left(\frac{D_{0_i}}{D_i}\right) + \frac{1}{2\lambda_{Al}} \ln\left(\frac{D_i}{d_i}\right)},$$

где  $Q$  – тепловая мощность, необходимая для обогрева рассматриваемой камеры, Вт;  $\sum H_{is}$  – суммарная длина изолированных участков цилиндрических корпусов камер, м;  $t_{max}$  – температура греющего кабеля, °С (в общем случае для кабеля марки ЭНГЛ-1 она составляет 180°С);  $D_{0_i} = D_i + \delta_{rub}$  – диаметр, соответствующий размещению нихромовых нитей кабеля на корпусе камеры, м.

Максимальное число витков греющего кабеля на корпусе камеры может быть рассчитано по формуле

$$n_{max} = \frac{\sum H_{is}}{b_{rub}}, \quad (4)$$

где  $b_{rub}$  – ширина греющей ленты.

Количество тепла, выделяемое греющим кабелем, равно

$$Q = q_{l\_rub} l_{rub}, \quad (5)$$

где  $q_{l\_rub}$  – удельная мощность греющего кабеля [10];  $l_{rub} = \pi D_i n_{max}$  – длина греющего кабеля, намотанного на корпус, м.

Расчет тепловой мощности по формуле (5) показал, что невозможно обеспечить необходимую нагрузку обогрева камер трансформатора тока и кабельного ввода при открытом размещении КРУЭ ZF7-126 (см. табл. 5) даже при намотке ленты без зазоров (4) на заданных участках и выбранной максимальной удельной мощности 100 Вт/м ленты ЭНГЛ-1. При закрытом размещении КРУЭ ZF7-126 тепловые потери в окружающую среду существенно ниже, что позволяет обеспечить работоспособность оборудования при температуре окружающего воздуха –45°С без изменения предложенной концепции.

Температура внутренней стенки корпуса на максимально удаленном от участка обогрева расстоянии  $t_{cold}$  (точки I–IV на рис. 3) может быть рассчитана по формуле

$$t_{cold} = (t_w - t_0) \frac{\text{ch}[m(L_{cold} - y)]}{\text{ch}(mL_{cold})} + t_0, \quad (6)$$

где  $y = L_{cold}$  – расстояние от границы греющего кабеля, покрытого тепловой изоляцией, до максимально удаленной от него точки корпуса, м;

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_{air} \sigma}{\lambda_{Al} f}};$$

$\text{ch}(mL_{cold}) = \frac{e^{mL_{cold}} + e^{-mL_{cold}}}{2}$ ;  $\sigma = \pi(D_i + d_i)$  – периметр ребра, м;  $f = \frac{\pi}{4}(D_i^2 - d_i^2)$  – площадь поперечного сечения ребра, м<sup>2</sup>.

Задаваясь в (6) значениями  $y$  в диапазоне от 0 до  $L_{cold}$ , можно определить изменение температуры на внутренней стенке корпуса по мере удаления от нагревателя (рис. 5).

Результаты вычислений и выбора параметров греющего кабеля при  $q_{l\_rub} = 100$  Вт/м,  $\alpha_{air} = 5$  Вт/(м<sup>2</sup> · К), а также температур в характерных точках представлены в табл. 6.

Температуры на внутренней стенке корпуса  $t_w$  и  $t_{cold}$  получены при расчете минимально необходимой мощности  $Q$  для обогрева камер КРУЭ. При этом  $Q_{max}$ , рассчитанная из условия намотки без зазоров греющей ленты удельной мощностью 100 Вт/м, для всех камер превышает  $Q$  (для камеры выключателя  $Q_{max}/Q > 3$ ). Скорректировать такое превышение возможно снижением удельной мощности греющей ленты либо уменьшением числа витков ее намотки.

Анализ полученных результатов показал возможность достижения заданных температур внутренней стенки цилиндрического корпуса (не

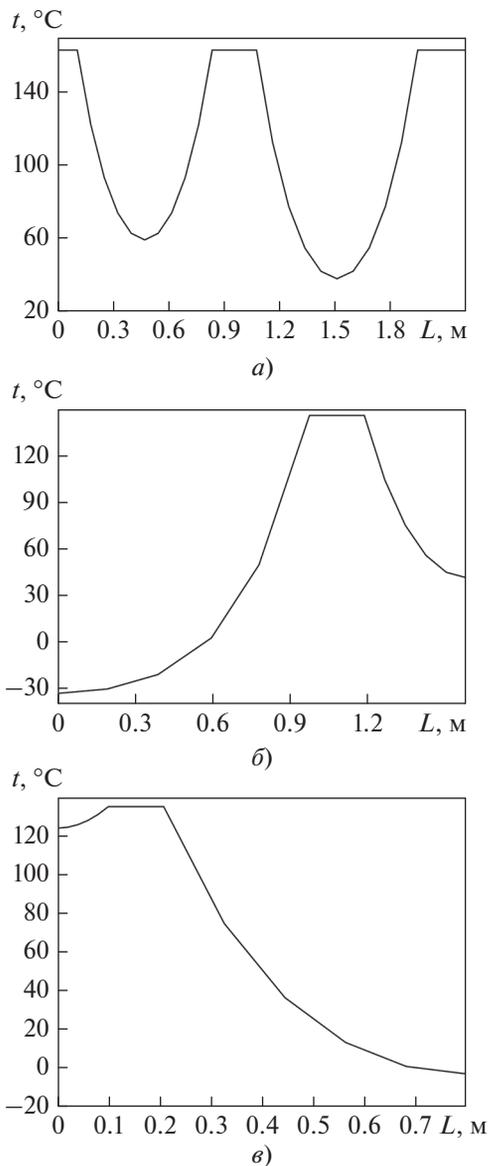


Рис. 5. Распределение температуры  $t$  на внутренней стенке цилиндрического корпуса ячейки КРУЭ с теплоизолированными греющими участками по его высоте (длине)  $L$  для камеры выключателя (а), трансформатора тока (б) и кабельного ввода (в)

ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ ) практически для всех камер. Единственным исключением является температура в холодной точке камеры трансформатора тока, которая даже в случае высокой максимальной температуры (что в соответствии с данными производителя возможно обеспечить по заказу) составляет  $-29^{\circ}\text{C}$ . Однако расчет температуры в наиболее холодной точке производился без учета контакта этой камеры с камерой выключателя. В точке  $I$  (см. рис. 3), в соответствии с полученными результатами, температура достигает  $39^{\circ}\text{C}$ , что с учетом теплопередачи через стенку крышки, разделяющей камеры, позволит обеспечить подогрев элегаза на холодном конце камеры трансформатора тока (точка  $III$ ). Кроме того, при таком существенном изменении температуры по длине внутренней стенки камеры трансформатора тока можно ожидать естественную циркуляцию элегаза в камере, а следовательно, и перемешивание с газом более высокой температуры.

### ВЫВОДЫ

1. Изоляционная и коммутационная способность КРУЭ при размещении и эксплуатации на открытом воздухе в районах с холодным климатом может быть обеспечена с помощью обогрева оборудования при температуре окружающей среды ниже допустимой.

2. При открытом размещении оборудования КРУЭ мощность обогрева, необходимая для компенсации тепловых потерь от вынужденной конвекции, достигает 66% общей мощности (по отдельным камерам до 77%), требуемой для вывода устройства из холодного состояния при температуре  $-45^{\circ}\text{C}$  в рабочий режим. При размещении оборудования КРУЭ в закрытых необогреваемых помещениях тепловые потери в окружающую среду могут быть снижены более чем в 3 раза по сравнению с открытым размещением.

3. Использование греющей ленты ЭНГЛ-1 позволяет обеспечить необходимые тепловые нагрузки обогрева оборудования КРУЭ без существенного усложнения и удорожания конструк-

Таблица 6. Значения параметров намотки кабеля и температуры в характерных точках камер КРУЭ ZF7-126 с обогревом при закрытом их размещении

Номер точки на рис. 3	$n_{\max}$	$l_{rub}, \text{ м}$	$Q_{\max}, \text{ Вт}$	$Q, \text{ Вт}$	$t_w, ^{\circ}\text{C}$	$t_{cold}, ^{\circ}\text{C}$
Камера выключателя						
$I$ (нагрев от ленты 1)	11	33.9	7697	2510	163.2	37.7
$I$ (нагрев от ленты 2)	10	30.8				37.7
$II$ (нагрев от ленты 2)						59.0
$II$ (нагрев от ленты 3)	4	12.3				59.0
Камера трансформатора тока						
$III$	8	20.3	2036	1470	145.6	$-34.0$
Камера кабельного ввода						
$IV$	4	10.9	1088	1040	135.2	$-3.1$

Примечание.  $Q_{\max}$  – максимально возможная мощность обогрева.

ции. Однако выбор удельной мощности и длины греющего кабеля должен определяться не только условием обеспечения необходимой мощности обогрева, но и проверкой на возникновение локальных зон конденсации элегаза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Надежность** комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией. Анализ зарубежного опыта / А.М. Абдурахманов, М.Ш. Мисриханов, В.Н. Рябченко, Е.В. Федорова, А.В. Шунтов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2013. № 1. С. 16–20.
2. **Самылов П.** Опыт эксплуатации КРУЭ в ОАО “МОЭСК” // Электроэнергия. Передача и распределение. 2012. № 2 (11). С. 100–101.
3. **Солодов П., Савков С.** КРУЭ. Путь к совершенству длиной в 35 лет // Электроэнергия. Передача и распределение. 2013. № 6 (21). С. 102–104.
4. **Применение** прогрессивных решений в разработках газонаполненного оборудования высокого напряжения / М.В. Зеткин, А.Н. Иванов, А.С. Иванов, Ф.В. Камалов, Д.Е. Парфенов, А.В. Рахматулин, В.С. Чемерис // Электричество. 2011. № 9. С. 20–28.
5. **Абрамов А.А.** Применение элегазового оборудования в электроэнергетике // День науки. Материалы XXIX науч. конф. Амур. гос. ун-та: сб. Благовещенск, 23–25 ноября 2020 г. С. 55–56.
6. **Электрические** аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией / под ред. Ю.И. Вишневецкого. СПб.: Энергоатомиздат, 2002.
7. **База данных** о теплофизических и переносных свойствах веществ NIST REFPROP DATABASE Version 8.0.
8. **Ягов В.В.** Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2014.
9. **СП 131.13330.2020.** Строительная климатология. Свод правил. М.: Минстройжилкомхоз РФ, 2020.
10. **ЭНГЛ-1, ЭНГЛ-1-ТК.** [Электрон. ресурс.] Сокол-Электро. <http://www.sokol-electro.ru/promyshlennoe-primeneniye/greyushchaya-lenta/engl/>.

## Calculation of Heating Power of Gas Cameras of a GIS Linear Cell for Installation in Areas with a Cold Climate

I. S. Antanenkov<sup>a, \*</sup>, A. Y. Barinov<sup>b</sup>, Yu. A. Geller<sup>a</sup>, and V. I. Kuznetsov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

<sup>b</sup> ООО Eurocontract, Balashiha, Moscow oblast, 143900 Russia

\*e-mail: antanenkovais@mail.ru

**Abstract**—At present, the majority of large electrotechnical firms of the world develop and produce high-voltage equipment using SF<sub>6</sub> (electronegative gas or, as it is more often called, elegas). Elegas is a nontoxic, stable, chemically inert, nonflammable compound, having no color, smell, and taste, which exists at normal condition (20°C and 0.1 MPa) in a gaseous state. In complex of its properties, elegas is more preferential to use as insulation and arc-damping environment in electrical equipment. However, at low temperatures, elegas transfers from a gaseous to a liquid state, which leads to a decrease of breaking properties. This problem occurs during development of equipment for outside placement in areas with a cold climate. This disadvantage can be compensated for by heating the equipment at an ambient temperature lower than the saturation temperature of elegas. The solving of this task is considered in respect to the linear cell of complete switchgear gas-insulated (GIS) ZF7-126 by XD GROUP CHINA and EK BBA. The power of a unit needed to heat GIS cameras with elegas is determined under conditions of defreezing of equipment at an ambient temperature of –45°C for 2 h. The power must be enough for ensuring elegas transformation from a liquid state to a gaseous state (at inside wall of camera temperature of –20°C) and also be enough to heat units of GIS cameras frames and to compensate the heat losses from cameras surface. The results present a comparison of heat losses from the camera surface with placing GIS in the outside and in an enclosed (unheated) location. Recommendations were made to choose specific capacity and length of heating cable with heat of the area of cylindrical surface of GIS cameras. The results demonstrated a change in calculation on the inside wall of the camera with distance from area of the insulation surface.

**Keywords:** elegas, electronegative gas, integrated switchgear, condensation, specific capacity of heat cable, reliability, heat losses, high-voltage equipment